

具有可行域内 Steiner 点寻优能力的 配电网网架规划方法

施鹏佳¹, 雷勇¹, 张林垚¹, 王秋琳², 刘心², 唐滢淇³, 董树锋³

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福州市 350012;
2. 福建亿榕信息技术有限公司, 福州市 350003; 3. 浙江大学电气工程学院, 杭州市 310027)

摘 要: 文章研究配电网规划中网架规划的问题, 提出了一种基于 Steiner 最小树的配电网网架规划新方法, 解决了以往研究中没有考虑到的在规划中引入中间节点, 并在可行域内寻优的问题。首先用路径描述方法建立了配电网网架规划的数学模型, 然后将该数学模型转换成欧式 Steiner 最小树问题, 并采用模拟退火算法求解。通过在算法中对 Steiner 点进行启发式搜索, 实现了在可行域中搜索中间节点的方法, 扩大了中间节点的选取范围, 增大了搜索到全局最优解的概率。最后, 通过算例分析验证了算法的性能和有效性。
关键词: 配电网规划; 路径描述; Steiner 最小树; 模拟退火算法

Distribution Network Planning Method with Feasible Domain-Wide Steiner Point Optimization Capability

SHI Pengjia¹, LEI Yong¹, ZHANG Linyao¹, WANG Qiulin²,
LIU Xin², TANG Yingqi³, DONG Shufeng³

(1. Institute of Economics and Technology, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350012, China;
2. Fujian Yirong Information Technology Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: This paper mainly studies the problem of frame planning in distribution network planning. A new planning method for distribution network is proposed on the basis of Steiner Minimum Tree, which is to solve the problems with no consideration in the introduction of intermediate nodes and searching the best solution in the feasible areas in the planning of the previous research. Firstly, this paper establishes a mathematical model of distribution network planning using the path description method. Then it converts the mathematical model into a Euclidean Steiner Minimum Tree problem and uses the simulated annealing algorithm to solve it. By heuristically searching the Steiner point in the algorithm, we have made searching for intermediate nodes in feasible regions possible and we have expanded the selection range of intermediate nodes. In addition, we have also increased the probability of searching for a global optimal solution. Finally, the performance and effectiveness of the algorithm are verified by example analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677165).

KEYWORDS: distribution network planning; path description; Steiner minimum tree; simulated annealing algorithm

中图分类号: TM 715 文献标志码: A 文章编号: 1000-7229(2019)12-0104-09
DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2019.12.013

0 引 言

配电网处于电力系统末端, 直接向用户供电, 配电网规划也是整个电力系统规划的重要组成部分^[1]。配电网规划包括变电站选址、网架规划、馈线路径选择、馈线型号选择及用户实际需求匹配等多方面的因素,

是一个综合性的问题, 其数学本质是一个复杂的离散性、非线性、多目标的组合优化问题^[2]。本文主要针对近期规划讨论中配电网的网架规划问题。

目前, 文献中提出的配电网网架规划方法多数是在已经预先选定的变电站或线路集合中选取一个子集, 得到配电网网架的最优解。文献[3]算例中负荷点的位置、负荷需求和电源点的位置是初始已知条件, 没有在规划中考虑增加中间节点。文献[4]算例中待建

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677165); 国网福建省电力有限公司科技项目(52130N16000J)

设的变电站节点和负荷节点的位置以及馈线集合都在规划前确定。文献[5]介绍的基于蚁群算法的配电网规划方法,也是在待选馈线集合、负荷节点和变电站节点均已预先确定的情况下进行的规划。文献[6-8]中提出的含分布式电源的配电网网架规划方法,均是在分布式电源可选安装位置和可选线路集合确定的情况下实施的。文献[9]提出的主动配电网规划-运行联合优化模型,虽然能够解决主动配电网中 DG 和储能系统选址定容的问题,但其选址点的搜索集合还是在有限点集内的。文献[10]提出的针对主动配电网分布式电源不确定性的多阶段规划方法,在规划的过程中虽然考虑了有限线路的开关状态,只在有限点集中搜索分布式电源机组安装位置,但是没有考虑增加中间节点的情况。同样地,文献[11-13]中提出的配电网规划方法,也是基于传统的规划方法,没有考虑增加中间节点使得网架规划更优的情况。上述文献虽然能够在待选变电站、分布式电源接入待选点或馈线集合中找到最优解,但在已经给定的变电站或馈线集合中选取子集构成配电网网架,无疑排除了增加一些中间节点得到更优结果的可能性。文献[14]引入了 Steiner 最小树的概念,说明可以增加一些中间节点来使得网架规划数学模型中的目标函数值更小。但当中间节点在地理上可以在可行域上而不是在可行点上选取时,上述方法就具有一定的局限性。

本文在上述研究的基础上,提出一种基于 Steiner 最小树的配电网网架规划方法,解决在规划中考虑引入中间节点并在可行域内寻优的问题。本文首先用路径描述方法描述配电网的网架规划模型,然后将该模型转化成欧式 Steiner 最小树问题,并提出针对该问题的求解算法。本文方法突破传统配电网网架规划方法中在可行点内搜索最优解的瓶颈,扩大寻优的范围,为配电网网架规划提供新的可行方法。

1 目前考虑增加中间节点的配电网网架规划方法的不足

中间节点:在配电网网架中除去已有负荷节点、变电站节点和待增加的分布式电源节点之外的新增节点。中间节点带有负荷容量为 0,考虑理想情况,中间节点的功率损耗亦为 0。

可行域:在本文中指进行配电网规划时,允许增加中间节点的区域,通常通过实际的地理测量和考察,并综合考虑电网潮流等因素得到,与实际的地理环境有关。

可行点:在本文中指进行配电网规划时,增加的中间节点的待选集合,为有限集,一般根据实际的地

理测量和考察,并综合考虑电网潮流等因素得到。

图 1 展示了一个简单的配电网网络架构,其中阴影颜色节点为电源点,实心黑色节点为负荷节点,白色空心节点为添加的中间节点。上述定义中,可行点即为图 1 中的白色空心节点,是待选的可增加中间节点集合,待增加的中间节点从上述可行点中选取,即为传统考虑增加中间节点的配电网网架规划方法。上述定义中,可行域即为图中的阴影部分,除了传统的中间节点搜索方法外,中间节点还可以从可行域中查找,其可能选择涵盖可行域中所有的点位置,是本文提出的寻找中间节点的方法。

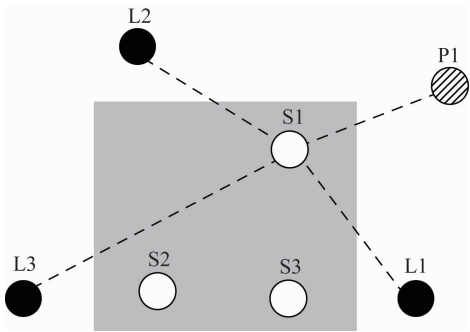


图 1 名词定义说明示意图
Fig. 1 Definition of terms

目前在考虑增加中间节点的网架规划算法中,例如文献[14],是基于中间节点在可行点中搜索而设计的,即可行点的位置固定,而可行点的初始位置设置具有很大的经验局限性,给配电网网架结构的进一步优化带来了局限性。本文的基本思想是通过移动某些中间节点的位置来得到新的网架结构,那么就有可能得到配电网网架规划函数的更优解,即在可行域中寻找中间节点,并结合中间节点的位置生成最优网架结构。为了综合考虑实际规划中中间节点选址建设的约束条件,本文将在事先确定好的可行区域中搜索中间节点。

2 配电网网架规划问题

配电网网架规划问题^[15]可表述成:负荷点位置及负荷大小经负荷预测已初步确定,由于本文主要针对配电网近期规划,在配电网近期规划中,由于时间周期较短,负荷总量的变化不大,因此可以认为经负荷预测所得的负荷大小即为规划期内负荷总量。供电区域的变电站位置已经确定,以变电站、中间节点、配电网建设费用及运维费用最少为目标,确定馈线路径和中间节点位置。本文采用路径描述方法来对配电网网架拓扑结构进行描述,并建立配电网规划的数学模型。

2.1 基于路径描述的配电网拓扑结构

定义 P_k^i 为以负荷节点 i 为末端的第 k 条可能供

电路径^[16-17]。设负荷节点 i 共有 L 条可能的供电路径,用集合 Π_L^i 表示负荷节点 i 的所有供电路径,则

$$\Pi_L^i = \{P_1^i, P_2^i, \dots, P_k^i, \dots, P_L^i\} \quad (1)$$

定义二进制变量 W_k^i 描述路径 P_k^i 的状态, W_k^i 为以负荷节点 i 为末端的第 k 条路径的决策变量,用二进制0和1表示是否建设此路径:

$$W_k^i = \begin{cases} 1, & \text{路径 } P_k^i \text{ 连通} \\ 0, & \text{路径 } P_k^i \text{ 断开} \end{cases} \quad (2)$$

定义负荷节点 i 的所有供电路径 Π_L^i 中经过支路 j 的所有路径的集合为 Π_q^j ;其中第 k 条路径为 γ_k^j ;总路径数为 q ,则

$$\Pi_q^j = \{\gamma_1^j, \gamma_2^j, \dots, \gamma_k^j, \dots, \gamma_q^j\} \quad (3)$$

根据配电网闭环设计,开环运行的特点,在实际运行时, Π_L^i 中的路径有且仅有一条是连通的。配电网辐射状运行约束可以用该网络中所有负荷节点供电路径状态的集合描述。文献[18-19]证明了若以下2个约束条件成立,那么网络为辐射状的:

1)对于任意一个负荷节点 i ,以该节点为终点的供电路径集中,有且仅有一条是连通的,即

$$\sum_{P_k^i \in \Pi_L^i} W_k^i = 1, \forall i \quad (4)$$

2)若路径 P_k^i 为通路,则包含在路径 P_k^i 内的任意路径 P_m^l 也是通路,即

$$W_k^i \leq W_m^l, \forall P_m^l \subset P_k^i \quad (5)$$

2.2 基于路径描述的配电网网架规划数学模型

本文建模时主要考虑变电站和中间节点的投资和运维费用、线路投资费用以及网损造成的电能损耗费用。变电站、中间节点及线路的投资费用采用等年值法将其折算成平均分布在每年内的投资费用,模型以一年(8760 h)为计算的单位时间,所述配电网网架规划问题的目标函数如下:

$$\min z = F_s + F_f + F_{\text{loss}} \quad (6)$$

式中: z 为最终费用,也是配电网网架规划问题的优化目标; F_s 为变电站和中间节点的投资及运维费用; F_f 为配电网线路建设费用; F_{loss} 为配电网损耗费用。

2.2.1 变电站和中间节点的投资及运维费用 F_s

$$F_s = \sum_{i=1}^m [\omega f(s_i) + u(s_i)] + \sum_{i=1}^n [\omega g(r_i)] \quad (7)$$

式中: m 为变电站个数; n 为中间节点个数; ω 为等年值投资回收系数,由如下关系式计算得到

$$\omega = \frac{r_0(1+r_0)^T}{(1+r_0)^T - 1} - 1 \quad (8)$$

式中: r_0 为贴现率; T 为折旧年限; $f(s_i)$ 为变电容量 s_i 的变电站建设费用; $u(s_i)$ 为变电容量 s_i 的变电站运维费用; $g(r_i)$ 为第 i 个中间节点的建设费用。其

中, $f(s_i)$ 、 $u(s_i)$ 、 $g(r_i)$ 在实际工程中都可以通过统计方法得到,本文为了说明算法原理,采用假设定值的方法,具体参数将在第5节算例分析中叙述。

2.2.2 配电网线路建设费用 F_f

$$F_f = \omega \alpha \beta_1 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{P_k^i \in \Pi_L^i} l_k^i W_k^i \right) \quad (9)$$

式中: n 为负荷节点个数; α 为线路回路数,含义为从变电站规划出 α 回线路接入负荷点,本文线路回路数中的一回线路中,包含了A、B、C三相导线,线路回路数 α 在实际工程中可以通过实地考察得到,也可以针对不同线路回数对式中的线路回路数进行不同设置,本文为了说明算法原理,采用假设定值的方法,具体参数将在第5节算例分析中叙述; β_1 为单位长度线路建设费用; l_k^i 为以负荷节点 i 为末端的第 k 条可能的供电路径长度,在负荷节点和变电站节点确定的情况下为规划前的已知常数。

2.2.3 配电网损耗费用 F_{loss}

配电网损耗主要包括线路损耗和变压器损耗,而变压器损耗包括空载损耗和负载损耗,在配电网网架规划问题中,配电变压器损耗和等效负荷中心负荷大小最相关,与配电网网架相关性较小,因此本文主要考虑线路损耗^[20]。计算线路损耗的支路模型与其符号参数如图2所示。

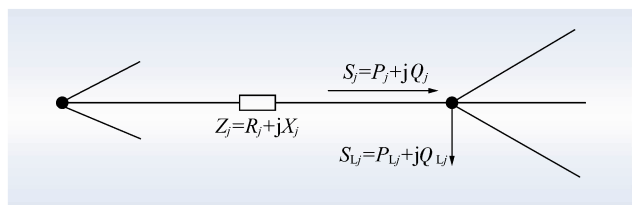


图2 计算线路损耗的支路模型与其符号参数

Fig. 2 Line section model and notation adopted for calculating line loss

支路 j 的有功损耗可由式(10)表示^[21]。

$$\Delta P_j = R_j I_j^2 = R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \quad (10)$$

式中: U_j 为节点 j 的电压; R_j 为支路 j 的等效电阻,一般情况下与线路长度有关。

$$R_j = \frac{\rho l_k^j}{S} \quad (11)$$

式中: ρ 为导线的电阻率; S 为导线的横截面积。

支路 j 输送的有功功率 P_j 等于节点 j 及其下游节点的有功需求与支路有功损耗之和。实际的配电网中需要增加并联电容器、同步调相机等无功补偿设备,以尽量减少线路上功率的传输,因此可以认为相比于线路末端的有功负载,线路支路的损耗较小,可忽略不计^[21]。支路 j 的无功功率 Q_j 同理。因此:

$$\begin{cases} P_j = \sum_{i \in j} P_{L,i} \\ Q_j = \sum_{i \in j} Q_{L,i} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{L,i}$ 为节点 i 的有功负荷需求; $Q_{L,i}$ 为节点 i 的无功负荷需求; $i \in j$ 表示节点集合 i 包括节点 j 及节点 j 下游的节点。

支路 j 的有功功率 P_j 和无功功率 Q_j 与配电网拓扑结构紧密相关,则式(12)可改写为

$$\begin{cases} P_j = \sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i P_{L,i} \\ Q_j = \sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i Q_{L,i} \end{cases} \quad (13)$$

因此,式(11)可改写为

$$\Delta P_j = R_j \frac{(\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i P_{L,i})^2 + (\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i Q_{L,i})^2}{U_j^2} \quad (14)$$

整个配电网的有功损耗为

$$\Delta P_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^B \Delta P_j \quad (15)$$

式中: B 表示配电网支路总数; ΔP_{sum} 为整个配电网的功率损耗。

将上述功率损耗代入电能计费模型,可得到配电网损耗费用 F_{loss} 如下:

$$F_{\text{loss}} = \beta_2 T_2 \sum_{j=1}^B R_j \frac{(\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i P_{L,i})^2 + (\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i Q_{L,i})^2}{U_j^2} \quad (16)$$

式中: β_2 为电价; T_2 为电能计算时间,一般取一年(8 760 h)为计算基准。

式(13)、(14)、(16)中出现的负荷节点 i 的所有供电路径 Π_L^i 中经过支路 j 的所有路径的集合 Π_j^i , 是为了在计算线路损耗 F_{loss} 时,限定参与计算的路径为 P_k^i 中经过支路 j 的路径。

将上述关系式代入所述配电网网架规划问题的目标函数,可以得到以下用于计算的配电网网架规划的数学模型:

$$\begin{cases} \min z = F_s + F_f + F_{\text{loss}} \\ F_s = \sum_{i=1}^m [\omega f(s_i) + u(s_i)] + \sum_{i=1}^n [\omega g(r_i)] \\ F_f = \omega \alpha \beta_1 \sum_{i=1}^n (\sum_{P_k \in \Pi_L^i} l_k^i W_k^i) \\ F_{\text{loss}} = \beta_2 T_2 \sum_{j=1}^B R_j \frac{(\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i P_{L,i})^2 + (\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i Q_{L,i})^2}{U_j^2} \end{cases} \quad (17)$$

本文所述配电网网架规划问题的目标函数还需要满足下面的约束条件:

1) 配电网拓扑结构约束。

配电网拓扑结构需满足式(4)和(5),即网络保证连通且为辐射状。

2) 潮流约束。

$$AP = D \quad (18)$$

式中: A 为节点关联矩阵; P 为网络潮流; D 为负荷需求。

3) 馈线载流量约束。

$$\sqrt{(\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i P_{L,i})^2 + (\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i Q_{L,i})^2} \leq S_{j,\max} \quad (19)$$

式中 $S_{j,\max}$ 表示支路 j 的最大载流量。

4) 电压降约束。设网架中变电站到所有 n 个负荷点中第 i ($1 \leq i \leq n$) 个负荷点的电压降落为 ΔU_i , 则变电站到所有 n 个负荷点的电压降落均应小于最大允许的电压降落 $\Delta U_{\max}$, 其值可根据电网具体运行要求确定,一般最大允许电压降落 $\Delta U_{\max}$ 的值为额定电压的 10%。因此有

$$\max \{\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_i, \dots, \Delta U_n\} \leq \Delta U_{\max} \quad (20)$$

3 基于 Steiner 最小树的配电网网架规划模型

3.1 配电网网架规划的模型变换

式(17)所描述的配电网网架规划的数学模型中,目标函数值由变电站和中间节点的投资及运维费用 F_s 、配电网线路建设费用 F_f 和配电网损耗费用 F_{loss} 三者组成。其中变电站和中间节点的投资及运维费用 F_s 可在一次配电网网架规划中预先估计,并设置为常数,规划的主要目标是配电网线路建设费用 F_f , 与配电网馈线总长度有关,在规划完成后对配电网损耗费用 F_{loss} 进行计算即可得到目标函数值。按照上述简化条件对所描述的配电网网架规划数学模型的目标函数改写如下:

$$\begin{cases} \min z = F_s + F_f + F_{\text{loss}} \\ F_s = \sum_{i=1}^m C_1 + \sum_{i=1}^n C_2 \\ F_f = C_3 \sum_{i=1}^n (\sum_{P_k \in \Pi_L^i} l_k^i W_k^i) \\ F_{\text{loss}} = \beta_2 T_2 \sum_{j=1}^B R_j \frac{(\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i P_{L,i})^2 + (\sum_{P_k \in \Pi_j^i} W_k^i Q_{L,i})^2}{U_j^2} \end{cases} \quad (21)$$

式中: C_1 为变电站的投资及运维费用系数; C_2 为中间

节点的投资及运维费用系数; C_3 为线路建设费用系数。

式(21)的主要目标是在负荷节点和电源节点均确定的情况下,求解得到平面上的一个网络拓扑,使得负荷节点和电源节点构成连通电气岛,且最终费用 z 最小。而在一些情况下,单独采用已知变电站节点和负荷节点构成配电网网架往往不能满足馈线总长度最短的要求。为此,有必要考虑一类增加中间节点的问题,称为 Steiner 最小树问题,添加的中间节点称为 Steiner 点,简称 s -点。因此加入中间节点的配电网网架规划模型可转化为对平面上的欧式 Steiner 最小树问题的求解。同时,为了弥补传统文献中在可行点中寻找中间节点方案的不足,本文采用在可行域中寻找中间节点的方案。

3.2 基于 Steiner 最小树的配电网网架规划

综上,第 2 节描述的配网网架规划问题可以转化为:已知负荷节点的位置坐标、需求大小和变电站节点的位置,要在上述配电网中寻找中间节点,使得式(21)的目标函数值最小,同时满足 2.2 节中所述的约束条件。针对用于规划的转换后的 Steiner 最小树^[22],需要对 2.2 节中所述的约束条件进行改写如下:

1) 配电网拓扑结构约束:在求解 Steiner 最小树问题的过程中需要构建最小生成树,配电网拓扑结构的连通性和辐射状自动满足式(4)和(5)。

2) 潮流约束^[23]:实质为潮流计算结果收敛,在配电网网架规划中可以与约束条件 3) 一起考虑。

3) 馈线载流量约束:通过计算每条馈线输送的容量,判断馈线载流量是否越限。在本文算法完成初步规划后,程序将计算每条馈线输送的容量,对馈线载流量约束条件进行判断。约束条件如下

$$\sqrt{\left(\sum_{P_k \in \Pi_j} W_k^i P_{L,i}\right)^2 + \left(\sum_{P_k \in \Pi_j} W_k^i Q_{L,i}\right)^2} \leq S_{j,\max}$$

(22)

4) 电压降约束:划定最大供电半径,即供电线路最大长度。设网架中变电站到所有 n 个负荷点中第 i ($1 \leq i \leq n$) 个负荷点的供电线路长度为 L_i ,为满足电压要求,允许的最大供电线路长度为 $L_{\max}$,则

$$\max\{L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n\} \leq L_{\max}$$

(23)

通过合理选择变电站建设的初始位置,可以使得规划结果满足此约束条件,因此不需要体现在 Steiner 最小树的求解过程中^[24]。

3.3 配电网网架规划中中间节点的选址约束

对于实际的配电网网架规划,还存在着中间节点选址的问题,文献[25]以一个地区枢纽型物流中心

选址的问题为例,指出类似的欧式 Steiner 最小树问题与传统的欧式 Steiner 最小树问题存在的差异:在传统问题中的搜索空间为连续的,而新问题的搜索空间为离散的,因为可选中间节点的区域受地理环境的制约。因此,需要在解决传统欧式 Steiner 最小树算法的基础上进行改造,使 Steiner 点的搜索区域限制在从原搜索空间中除去不可行域的范围内,即从搜索可行区域中查找 Steiner 点^[26]。

设由原始点集的坐标位置确定的 Steiner 搜索矩形区域范围为 $\max_x \times \max_y$ ($\max_x$ 、 $\max_y$ 分别为矩形区域的长和宽)^[27]。设 Steiner 点的搜索可行区域共有 n 个,分别为

$$\Omega_i = f_i(x, y), 1 \leq i \leq n$$

(24)

式中: x, y 为平面上的点; $f_i(x, y)$ 为由这些点构成的表达式,以确定 Steiner 点的搜索可行区域 Ω_i 。

Steiner 点的搜索可行区域全集设为 Ω

$$\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_i, \dots, \Omega_n\}$$

(25)

查找 Steiner 点的方法如下^[28-30],即首先不考虑可行区域,随机选择增加、删除或移动 Steiner 点方法中的一个。

如果随机选择的方式为增加 Steiner 点,则首先随机生成 Steiner 点,其坐标为 (x, y) ,判断下述关系式是否成立

$$(x, y) \in \Omega$$

(26)

若式(26)成立,则保留生成的 Steiner 点;若不成立,则重新生成 Steiner 点,直到满足式(26)为止。

如果随机选择的方式为移动 Steiner 点,则目标 Steiner 点的位置同样按照上述方法确定。如果随机选择的方式为删除 Steiner 点,则不受可行区域的限制。

这样就为实际的配电网网架规划中间节点的合理选址增加了约束条件,也更加符合实际规划的要求,得到的结果更具有参考意义。

4 基于模拟退火的求解算法

在本文所述的规划问题中,原始点集包含负荷点集和变电站点集,采用模拟退火算法^[31]求解欧式 Steiner 最小树问题,需对原始点集作预处理。^[32]

具体实施方法如下:

步骤 1:由原始点集的坐标位置确定一个矩形区域 $\max_x \times \max_y$ ($\max_x$ 、 $\max_y$ 分别为矩形区域的长和宽),根据 3.2 节所述欧式 Steiner 最小树的性质可知,待求的 Steiner 点在该区域内。针对配电网网架规划对中间节点选址的需求,对原预处理方法进行专门设计,划定 Steiner 点搜索的可行域,在此区域中

对 Steiner 点进行搜索。

步骤 2:依据对点位置坐标的精度要求,把上述区域等分成 $n_x \times n_y$ 个网格($n_x = \max_x \times d + 1, n_y = \max_y \times d + 1; d$ 为网格细分倍数,取任意正整数),Steiner 点放在网格顶点上(即网格的角,简称格点);用格点的行、列值代替欧式平面上对应点的纵坐标和横坐标。

步骤 3:初始化退火温度 t_0 。

步骤 4:原始点集中共有 n 个点,对由 n 个点构成的图计算最小生成树,得到配电网网架结构,并按照式(21)计算目标函数值,更新记忆变量 last_result(前一次接受新解的迭代过程中最优解的值)、最优网架结构 bestAcceptedGraph,把接受 Steiner 点的集合 steinerAcceptedGridPointArray 设为空集。

步骤 5:在温度 t_k 下执行如下操作:

a) 设现有 m 个 s -点,按照 3.4 节中 Steiner 点的搜索方法对现有解增加扰动,并更新当前 Steiner 点集合 steinerGridPointArray;

b) 由 $n + m$ 个点构造完全图,边长即为两点间的权重;

c) 用 Prim 算法或者 Kruskal 算法按照式(21)计算目标函数值(new_result),并令 $\Delta W = \text{new_result} - \text{last_result}$;

d) 针对配电网网架规划约束条件的需求,在原模拟退火算法的基础上增加判断此网架结构是否满足潮流约束,若不满足则转 f),拒绝新解;若满足则转 e);

e) 若 $\Delta W < 0$,则接受新解;否则依概率 $\min\{1, e^{-\Delta W/t_k}\} > \text{random}[0,1]$,接受新解,其中,random[0,1]指[0,1]间的随机数;

f) 若接受新解,则更新 last_result 为 new_result,并更新对应数组,同时更新最优网架结构 bestAcceptedGraph 和接受 Steiner 点集合 steinerAcceptedGridPointArray;否则,回退当前 Steiner 点集合 steinerGridPointArray 为上一次的接受 Steiner 点集合 steinerAcceptedGridPointArray;

重复步骤 5 直至系统达到 t_k 下的平衡状态。

步骤 6:按 $t_k \leftarrow \text{温度下降率} \times t_k$ 的方式降温。

步骤 7:若满足算法终止准则($t_k < t_f, t_f$ 为终止温度),则退火过程结束,否则转步骤 5。

步骤 8:对最后得到的可行解根据式(21)计算目标函数值,得到此网架结构的总费用,并记录此费用支出及其对应的配电网网架规划布局图作为本规划问题的最优解。输出总费用最少的配电网网架规划布局网络图,针对配电网网架规划节点选址的需求,可根据实际地理位置和中间节点的建造要求进行局

部调整。

5 算例分析

将上述基于模拟退火算法求解 Steiner 最小树问题的配电网规划算法进行编程实现,对文献[33]中编号为 102 的变电站所供电的子网进行网架优化。原网架有 18 个负荷节点和 1 个变电站节点,如图 3 所示,其中灰色方块代表负荷节点,蓝色方块代表变电站节点,淡蓝色区域代表中间节点搜索的可行域。图 3 中首先对负荷节点和变电站节点构成的完全图计算最小生成树,进而得到不考虑增加中间节点的最优网架结构,作为算例分析的基准对比组。表 1 为各负荷点的坐标和负荷需求,设待建变电站的节点号为 P1,位置坐标为(0,0)。本文方法基于 Java 语言编程实现,采用的计算机 CPU 型号为 Intel Core i5-4258U、内存为 8 GB。

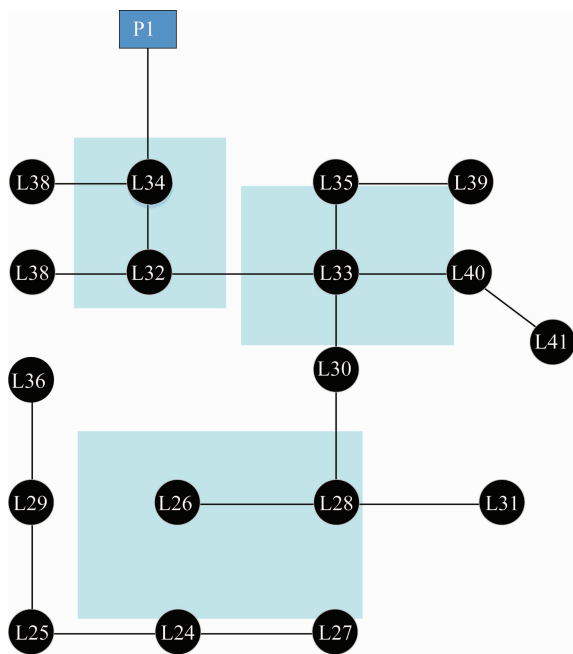


图 3 待优化的 18 个负荷节点和 1 个变电站节点的配电网
Fig. 3 Distribution network with 18 load nodes and 1 substation node required optimization

配电网基本参数如下:额定电压 10 kV,功率因数取 0.95,等年值投资回收系数 $\omega = 0.155$ 。馈线采用 LGJQ-2×300 分裂导线,回路数 α 取 3,导线电阻率为 $31.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$,线路阻抗为 $0.0525 \Omega/\text{km}$,单位长度线路建设费用 β_1 取 50 万元/km,电价 β_2 取 0.5 元/(kW·h),电能计算时间 T_2 取一年(8 760 h)。一个变电站的建设费用 $\omega f(s_i) + u(s_i)$ 取 100 万元,一个中间节点的建设费用 $\omega g(r_i)$ 取 0.5 万元。为了使算例表达更加清晰,本文以待建变电站为原点,水平向

右方向为 x 轴正方向, 竖直向下方向为 y 轴正方向, 以实际距离 5 km 对应单位坐标为比例, 建立平面直角坐标系。

模拟退火算法的参数如下: 退火起始温度 $t_0 = 150$, 退火终止温度 $f_m = 50$, 每个温度 t_k 下迭代的次数 $K = 300$, 温度下降率为 0.95。

表 1 各负荷点的坐标和负荷需求
Table 1 Coordinate and load demands for all load points

节点号	坐标	负荷需求/ (kV · A)	节点号	坐标	负荷需求/ (kV · A)
L24	(0,5)	0	L33	(1,2)	800
L25	(-1,5)	500	L34	(0,1)	0
L26	(0,4)	0	L35	(1,1)	1 000
L27	(1,5)	315	L36	(-1,3)	315
L28	(1,4)	0	L37	(-1,2)	240
L29	(-1,4)	500	L38	(-1,1)	400
L30	(1,3)	420	L39	(2,1)	250
L31	(2,4)	315	L40	(2,2)	315
L32	(0,2)	0	L41	(3,2.5)	100

模拟退火算法求解 Steiner 最小树问题的程序在运行过程中的收敛情况如图 4 所示。算例表明, 增加中间节点能够使配电网网架规划的目标函数值更小、总费用更优。同时, 本文所述算法用于求解配电网网架规划的 Steiner 最小树问题性能较好, 收敛速度较快, 总的迭代次数较少, 目标函数优化程度较高, 能满足实际规划中节约费用和优化运行的需求。经过程序优化得到的新配电网网架如图 5 所示, 其中红色方块代表新增加的中间节点, 也就是 Steiner 点。

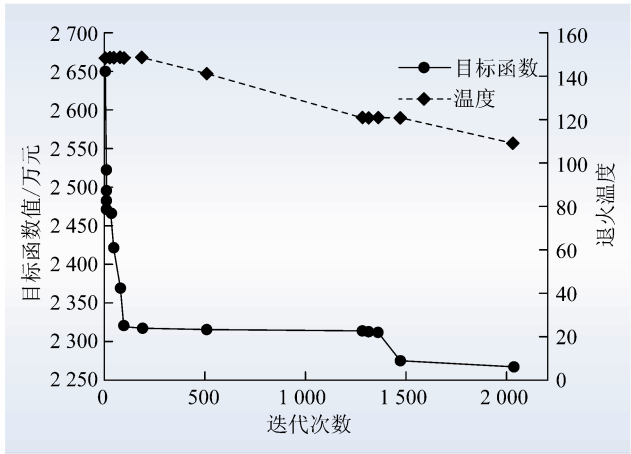


图 4 模拟退火算法求解 Steiner 最小树问题的收敛速度
Fig. 4 Convergence rate of simulated annealing algorithm for solving steiner minimum tree problem

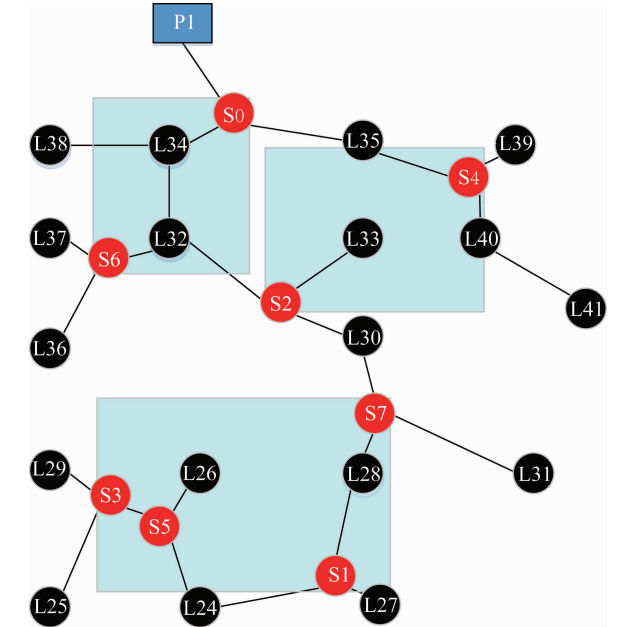


图 5 经过优化后的配电网
Fig. 5 Distribution network after optimization

某次计算优化前后的目标函数值如表 2 所示, 找到的 Steiner 点的坐标如表 3 所示。在表 2 中, 将本文所使用的在可行域内查找中间节点的方法与传统的在可行点中查找中间节点的方法进行性能对比。可以发现, 本文所述方法在目标函数优化方面具有显著的优越性, 能够得到更加优化的结果, 同时也避免了传统方法中设置初始可行点的经验性问题。特别是在大规模电网中, 这个问题将变得尤为突出。因此本文所述方法更具有工程通用性。

表 2 优化前后配电网网架的目标函数值
Table 2 Objective function value of distribution network before and after optimization

方法	优化前/万元	优化后/万元	优化比例/%
本文方法	2 652.93	2 269.47	14.454
传统方法 ^[14]	2 652.93	2 485.62	6.307

表 3 查找到的 Steiner 点坐标
Table 3 Coordinate of Steiner Points already been found

Steiner 点	横坐标	纵坐标
S0	0.2	0.6
S1	0.8	4.8
S2	0.6	2.6
S3	-0.8	4.2
S4	1.8	1.2
S5	-0.2	4.4
S6	-0.6	2.2
S7	1.2	3.8

由于启发式算法每次寻优结果不一样,因此在算例中进行了多次寻优测试。表 4 统计了运行 10 次程序求解得到的目标函数值和相对于原配电网的优化比例。可以看出,本文方法能够有效降低总体费用。

表 4 10 次求解得到的目标函数值及优化比例
Table 4 Objective function value and optimization ratio obtained by 10 times of solution

最小值/ 万元	最小值 优化 比例/%	最大值/ 万元	最大值 优化 比例/%	平均值/ 万元	平均值 优化 比例/%
2 232.18	15.860	2 343.78	11.653	2 274.90	14.250

6 结 论

本文运用 Steiner 最小树和启发式算法提出了解决配电网网架规划问题的一种新方法。首先,将路径描述方法运用在配电网规划上,为配电网规划数学模型的建立和后续将规划问题抽象为 Steiner 最小树模型打下了数学基础。然后,把基于路径描述的配电网网架规划问题转换成 Steiner 最小树模型,求解得到配电网网架结构,能够适应对配电网辐射状运行的要求,同时考虑电源负载量、潮流约束、馈线载流量和支路电压降落等约束条件。所提方法通过增加中间节点减少配电网网架线路总长度,对以往不增加中间节点或在可行点中查找中间节点的规划方法进行了完善,使得配电网网架规划方法更加灵活,中间节点的选取范围扩大,增大了搜索到全局最优解的概率,能够更有效地实现配电网的优化规划。算例表明:

1)在配电网网架结构中增加中间节点并与原始节点组合成新网架,待增加的中间节点通过算法在可行域中搜索得到而不是预先确定,能够有效地减少网架建设的总长度和总费用,有效地避免人为确定中间节点的局限性,使配电网网架规划更经济,Steiner 最小树用于配电网网架规划的效果明显,符合实际工程应用的需要。

2)本文设计了针对网架规划的 Steiner 最小树问题的模拟退火算法,算例表明,该算法收敛性好,收敛速度较快,搜索结果比较接近全局最优解,能够适应实际工程应用的需要。

针对更大规模配电网的规划问题,后续研究可以考虑采用并行计算等技术提高算法的计算效率,以加快求解过程的收敛速度。

7 参考文献

[1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社,1990.

[2] MIRANDA V, RANITO J V, PROENCA L M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4): 1927-1933.

[3] 王方方. 基于改进遗传算法的配电网规划[D]. 上海:上海交通大学, 2009.

WANG Fangfang. Distribution network planning based on improved genetic algorithm [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.

[4] 盛四清, 范林涛, 李兴, 等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 51-57.

SHENG Siqing, FAN Lintao, LI Xing, et al. Multi-objective planning of distribution network based on Pareto optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 51-57.

[5] 高炜欣, 罗先觉. 基于蚂蚁算法的配电网网络规划[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 110-114.

GAO Weixin, LUO Xianjue. Improved ant algorithm for distribution network planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 110-114.

[6] 于琳. 主动配电网多目标规划及控制分区研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.

YU Lin. Research on multi-objective planning and control partition of active distribution network [D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[7] 麻秀范, 崔焕君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.

MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.

[8] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.

WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.

[9] 沈欣炜, 朱守真, 郑竞宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.

SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.

[10] 曾鸣, 韩旭, 李博. 考虑不确定性的多阶段主动配电网规划模型研究[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 65-71.

ZENG Ming, HAN Xu, LI Bo. Study of multistage planning for active distribution networks under uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 65-71.

[11] 刘洪, 范博宇, 唐翀, 等. 基于博弈论的主动配电网扩展规划与光储选址定容交替优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 38-45, 116.

LIU Hong, FAN Boyu, TANG Chong, et al. Game theory based alternate optimization between expansion planning of active distribution system and siting and sizing of photovoltaic and energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 38-45, 116.

[12] 刘佳, 程浩忠, 徐谦, 等. 安全距离理论下计及故障恢复的智能配电网随机规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 64-71.

- LIU Jia, CHENG Haozhong, XU Qian, et al. Stochastic planning of smart distribution network based on security distance methodology considering fault recovery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 64-71.
- [13] 范心明, 陈锦荣, 吴树鸿, 等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 156-163.
- FAN Xinming, CHEN Jinrong, WU Shuhong, et al. Application of discrete learning optimization algorithm to distribution network reconfiguration considering distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 156-163.
- [14] 韩翔宇, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 斯坦纳树模型在含 DG 配电网规划中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 62-67.
- HAN Xiangyu, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Steiner tree model for distribution network planning with DG [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(6): 62-67.
- [15] 苗增强, 姚建刚, 李婷, 等. 改进的多目标遗传算法在配电网规划中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 63-67, 103.
- MIAO Zengqiang, YAO Jiangang, LI Ting, et al. Application of improved multi-objective genetic algorithm in distribution network planning [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(5): 63-67, 103.
- [16] 孙明, 董树锋, 夏圣峰, 等. 基于路径描述的馈线分区 $N-1$ 可装机容量计算方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 123-129.
- SUN Ming, DONG Shufeng, XIA Shengfeng, et al. Path description based calculation method for available capacity of feeder partition satisfied with $N-1$ security criterion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 123-129.
- [17] 徐成司, 董树锋, 孙洲, 等. 基于网络简化和深度优先遍历的配电网路径搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 170-176.
- XU Chengsi, DONG Shufeng, SUN Zhou, et al. A path searching algorithm for distribution network based on network simplification and depth first traversal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 170-176.
- [18] ROMERORAMOS E, GOMEZEXPOSITO A, RIQUELMESANTOS J, et al. Path-based distribution network modeling: Application to reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 556-564.
- [19] LLORENS-IBORRA F, RIQUELME-SANTOS J, ROMERO-RAMOS E. Mixed-integer linear programming model for solving reconfiguration problems in large-scale distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 88: 137-145.
- [20] 苏海峰, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 LCC 和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 118-125.
- SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved PSO [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-125.
- [21] 韩祯祥. 电力系统分析 [M]. 4 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
- [22] 张瑾, 马良. Steiner 最小树问题及其应用 [J]. 科学技术与工程, 2008, 8(15): 4238-4245, 4257.
- ZHANG Jin, MA Liang. Steiner minimum tree problem and its implementation [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(15): 4238-4245, 4257.
- [23] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [24] 金慧敏, 马良, 王周緌. 欧氏 Steiner 最优树的快速算法 [J]. 计算机应用研究, 2006, 23(5): 60-62.
- JIN Huimin, MA Liang, WANG Zhoumian. Fast algorithms for finding optimal euclidean steiner tree [J]. Application Research of Computers, 2006, 23(5): 60-62.
- [25] 张瑾, 顾剑锋, 马良, 等. 基于最优加权 Steiner 树的枢纽型物流中心选址问题 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 143-147, 153.
- ZHANG Jin, GU Jianfeng, MA Liang, et al. Location problem of junction logistic center based on optimal weighted steiner tree [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4): 143-147, 153.
- [26] HWANG F K, RICHARDS D S. Steiner tree problems [J]. Networks, 2010, 22(1): 55-89.
- [27] ARAGÃO M P D, WERNECK R. On the implementation of MST-based heuristics for the steiner problem in graphs [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2409: 1-15.
- [28] CHENG X Z, LI Y S, DU D Z, et al. Steiner trees in industry [J]. Handbook of Combinatorial Optimization, 2005.
- [29] DU D Z, HWANG F K. The steiner ratio conjecture of gilbert and pollak is true [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1990, 87(23): 9464-9466.
- [30] METROPOLIS N, ROSENBLUTH A W, ROSENBLUTH M N, et al. Equation of state calculations by fast computing machines [J]. The Journal of Chemical Physics, 1953, 21(6): 1087-1092.
- [31] 庞峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- PANG Feng. The principle of SA algorithm and algorithm's application on optimization problem [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [32] 金慧敏. 欧氏 Steiner 最小树问题的智能优化算法研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2005.
- [33] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的配电网规划方法 [J]. 电网技术, 2003, 27(3): 71-75.
- CHEN Genjun, WANG Lei, TANG Guoqing. An ant colony optimization based method for power distribution network planning [J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 71-75.

收稿日期: 2019-07-01

作者简介:

施鹏佳(1990), 男, 硕士, 研究方向为电网规划设计;

雷勇(1963), 男, 教授级高工, 研究方向为电力系统规划设计;

张林垚(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统规划工作;

王秋琳(1980), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划;

刘心(1983), 男, 学士, 主要研究方向为配电网规划;

唐滢淇(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划设计;

董树锋(1982), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为输配一体化电网分析、配电网建模和分析。

(编辑 刘文莹)